

ПРОБЛЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ГЕНЕРИРОВАННЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

П. П. Трохимчук

Восточноевропейский национальный университет им. Леси Украинки,

Луцк, Украина

E-mail: trope@yandex.ru

Обсуждается проблема моделирования механизмов образования лазерно-генерированных наноструктур. На поверхности при облучении в области собственного поглощения материала, как правило, возникают наноструктуры: нанохолмы при наносекундных режимах облучения [1–5] высотой до 100 нм или нанокolonны высотой до 450 нм при облучении сериями фемтосекундных импульсов [1, 4]. В объеме при воздействии лазерного излучения в области примесного поглощения возникают каскады микроструктур, нити длиной несколько сантиметров и диаметром несколько микрометров [1, 4].

Для объяснения этих экспериментальных данных используются различные методы моделирования: термодинамические [2, 3]; плазменные [1, 4]; электродинамические [6] и физико-химические [1, 5].

Рассмотрим вначале проблему образования поверхностных наноструктур. Из обзора экспериментальных результатов видно, что на однородность их образования влияют следующие факторы: однородность облучаемого материала; равномерность засветки; длина волны облучения и поляризация падающего излучения.

При соблюдении первых двух факторов однородные по высоте поверхностные наноструктуры получаются при облучении излучением с эллиптической или циркулярной поляризацией.

Длина волны облучения влияет следующим образом: чем больше коэффициент поглощения, тем более высокие наноструктуры получаются. Так, если при облучении кремния и арсенида галлия сериями импульсов неодимового лазера высота наноструктур (нанохолмов) составляет 15–20 нм, то при облучении германия с теми же режимами облучения высота наноструктур достигает уже 100 нм. Это можно объяснить следующим образом: при большем коэффициенте поглощения происходит более интенсивная фотоионизация и поэтому происходит более интенсивный свеллинг (разбухание) поверхности. При этом за счет разрыва ковалент-

ных химических связей в режиме насыщения возбуждения могут образовываться кристаллографические модификации с более высоким числом «электронегативности». Это и наблюдалось на эксперименте: верхние части нанохолмов германия имели гексагональную структуру, в отличие от исходного материала, который имел структуру алмаза. Дело в том, что в случае собственного поглощения при насыщении возбуждения мы должны перейти к приближению близкодействия и к химическим связям, так как речь идет о фазовых превращениях в облученном материале, а не об излучательной релаксации.

Наиболее существенные экспериментальные результаты были получены при облучении материала сериями импульсов от нескольких десятков для наносекундного режима облучения и до нескольких сотен для фемтосекундного режима. Сценарий образования поверхностных наноструктур при этом следующий. Первичные импульсы приводят к процедуре нелинейной фотоионизации приповерхностного шара, что является причиной появления затравочных фазонов [7]. Дальнейшее облучение в зависимости от интенсивности приводит либо к увеличению высоты наноструктур (в случае электромагнитного свелинга), либо к уменьшению (в случае тепловой релаксации).

Существенный интерес представляет случай образования объемных микроструктур. Первые экспериментальные результаты были получены еще в 1965 году [8] при экспериментальном подтверждении самофокусировки, которое сопровождалось образованием каскада объемных разрушений облучаемого материала

Следует отметить, что на эффективность дефектообразования большое влияние оказывают симметрия облучения и среды. В нелинейной оптике это задается условиями фазового синхронизма, практически условиями когерентности взаимодействия [8]. В прозрачных средах это обусловлено анизотропией локальных центров рассеяния излучения. В области собственного поглощения для полупроводников анизотропия обусловлена ковалентностью связей кристалла. Так, для антимонида индия накачка полупроводникового лазера оптическим излучением лежащим в области собственного поглощения полупроводника, а также эффективность дефектообразования при дальнейшем увеличении интенсивности облучения, будет наиболее эффективная при направлении излучения под углом $37,5^\circ$ к направлению $\{111\}$ или $62,5^\circ$ к направлению

{110}, другими словами перпендикулярно к плоскости чистой ковалентной связи (решетка сфалерита) [1]. На основании этого объясняется ориентационный эффект зависимости образования донорных центров в антимониде индия, генерируемых излучением наносекундных импульсов рубинового лазера [1].

Известно, что в сильных электрических полях симметрия облучаемого материала понижается, сфалерит переходит в вюртцит, тетрагональная симметрия в тригональную [6]. Причем выбирая режимы облучения мы можем с помощью лазерного облучения инициировать переходы не только от структур с более высокой симметрией к структурам с более низкой симметрией (включая кремний, германий и фазы углерода), но и наоборот – с более низких симметрий получать более высокие (например, лазерный отжиг ионноимплантированных слоев полупроводников) [1].

Таким образом, в данной работе проанализированы основные особенности проблемы моделирования лазерноиндуцированных поверхностных наноструктур и объемных микроструктур.

1. *Trokhimchuck P. P.* Nonlinear and Relaxed Optical Processes. Problems of interactions. Lutsk: Vezha–Print, 2013. 280 p.
2. Квантовая электроника: перспективные направления / Под ред. И. С. Манака. Минск: Академия управления при Президенте республики Беларусь, 2012. 184 с.
3. *Medvid' A.* (2010) Nano-cones Formed on a Surface of Semiconductors by Laser Radiation: Technology Model and Properties. Nanowires Science and Technology, ed. Nicoletta Lupu. Vukovar: Inech, 2010. P. 61–82.
4. *Макин В. С.* Закономерности образования упорядоченных микро и наноструктур в конденсированных средах при лазерном возбуждении мод поверхностных поляритонов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Санкт-Петербург: Государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2013. 384 с.
5. *Trokhimchuck P. P., Makoviychuk M. I., Dmytruk I. P.* // Физика взаимодействия излучений с твердым телом: Матер. 10-й Междунар. конф. Мн.: БГУ, 2013. С. 241–243.
6. *Паращук В. В.* Стримерные полупроводниковые лазеры. Характеристики и анализ. Штутгарт: Lambert Academic Publishing, 2013. 274 с.
7. *Стафеев В. И.* // Прикладная физика, №4, 2005. С. 31–38.
8. *Шен И.* Принципы нелинейной оптики. М.: Мир, 1989. 560 с.